

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI)

Disseny i Construcció d'un equip de laboratori per simular un assaig de tall directe basat en codi obert

MEMÒRIA

22 de juny de 2020

Autor: Arnau Omedes i Hervàs

Directors: Cristina Lampón Diestre

Codirector: Pere Prat Catalan

Convocatòria: Juny/2020



ETSEIB

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquesta memòria tracta el disseny i construcció d'un nou equip de laboratori per realitzar un assaig de tall directe a l'assignatura de Mecànica de Sòls (Departament de d'enginyeria civil i Ambiental (DECA d'ara en endavant)).

Aquest projecte engloba una tasca multidisciplinària essencial tant en el món canviant en el que vivim com en l'ànima mateixa de l'enginyer industrial que vol arribar a ser l'autor d'aquest treball. Per poder realitzar l'equip s'ha treballat en les següents disciplines: Mecànica, Electrònica i Informàtica.

L'objectiu concret d'aquest treball és aconseguir un aparell funcional per als estudiants de grau d'Enginyeria Civil. Apropar l'anàlisi de les propietats del sòl per definir terrenys òptims per la construcció és una de les tasques fonamentals de la Mecànica de Sòls. Definir el paràmetre clau de la cohesió ¹ resulta molt útil a l'hora d'estudiar la viabilitat de diferents projectes arquitectònics.

A nivell informàtic l'equip de laboratori també compta amb un software que va grafiant les dades a temps real i des d'on es pot controlar l'experiment. Aquest programa crea un fitxer de resultats que emmagatzema les dades.

A nivell electrònic s'han estudiat diferents components i possibilitats de cadascun per tal d'obtenir la màxima precisió a l'hora de prendre mesures amb els sensors per exemple.

A nivell mecànic s'ha estudiat l'estàtica de l'experiment i dimensionat el motor per tal de treballar en condicions òptimes.

Finalment s'ha volgut remarcar en tot el treball el procés de construcció i desenvolupament per tal de fer-lo amb els principis de lliure coneixement i codi obert. Amb aquest equip es pretén demostrar que el coneixement compartit i l'accés lliure del mateix disposen d'una gran potència per a realitzar projectes seriosos. Al mateix temps deixa en evidència que una màquina *lowcost* d'assaig de tall directe també pot ser funcional. D'aquesta manera serà fàcilment replicable a d'altres laboratoris d'universitats d'arreu i així es podrà introduir els conceptes de mecànica dels sòls sense el risc o el preu que suposa treballar amb una màquina professional.

¹Significa la màxima resistència tangencial en un pla qualsevol quan la tensió normal sobre ell és nul·la.[3.1](#)

Índex

1	Prefaci	6
1.1	Origen del projecte	6
1.2	Requeriments previs	6
2	Introducció	7
2.1	Objectius del projecte	7
2.2	Abast del projecte	7
3	Assaig de tall directe	8
3.1	Fonament teòric	8
3.1.1	Comportament teòric de sòls granulars assajats a tall directe	10
3.1.2	Modalitats d'assaig en funció de la velocitat	11
3.1.3	Modalitats d'assaig en funció de l'esforç horitzontal	12
3.1.4	Avantatges i inconvenients	12
3.2	Exemples pràctics i assaigs reals	12
3.3	Assaig del projecte	12
4	Disseny de l'equip	13
5	Electrònica	14
5.1	Components electrònics	14
5.1.1	Font d'Alimentació	15
5.1.2	Arduino MEGA	15
5.1.3	Sensor d'efecte Hall i mòdul 1	16
5.1.4	Cèl·lula de càrrega i mòdul 2	16
5.1.5	Motor pas a pas i mòdul 1 (<i>driver</i>)	17
6	Mecànica	18
6.1	Diagrama de forces	18
6.1.1	Definició del sistema	18
6.1.2	Mecànica estàtica: Dimensionament del motor just en el moment d'arrencada	18
6.2	Peces impreses en PETG	21
7	Informàtica	22
7.1	Funcionament del Programa	22
7.2	Comunicació i transferència de dades	27
7.3	Diagrama de flux	28
8	Prototip	29
8.1	Components	29
8.2	Eines	29
8.3	Construcció final del prototip	30
8.3.1	Preparació prèvia dels components:	30
8.4	Procés de construcció	32
8.5	Calibratge i posada a punt	33
8.6	Funcionament del Prototip	34

9 Pressupost	35
10 Impacte ambiental i social	36
11 Conclusions	38
12 Propostes de Millora	39
12.1 Nivell electrònic	39
12.2 Nivell mecànic	39
12.3 Nivell informàtic	39

Annex

Annex A: Codi del programa amb interfície i codi de la placa d'Arduino

Annex B: Plànols de les peces impreses

Índex de figures

1	Esquema en alçat de l'assaig de tall [1]	8
2	Gràfiques de caracterització [1]	9
3	Gràfica tensió tangencial - tensió normal amb recta de trencament. [1]	10
4	Gràfiques d'anàlisi [1]	10
5	Disseny preliminar renderitzat [2]	13
6	Esquema components de l'equip	14
7	Font d'alimentació [3]	15
8	Arduino MEGA [4]	15
9	Sensor soldat al mòdul 1	16
10	Cèl·lula de carrega [5]	16
11	Motor pas a pas, esquema bobines interiors [6]	17
12	Motor pas a pas collat a cargol i guia.[7]	17
13	Mòdul 1 o <i>Driver</i> [8]	17
14	Esquema de forces genèric [9]	18
15	Esquema de forces	20
16	Captura de pantalla de la pestanya 1	22
17	Pestanya 2	23
18	Pestanya 2 amb la força vertical seleccionada	23
19	Advertència	24
20	Tercera pestanya	24
21	Gràfica de Força (N) amb desplaçament horitzontal (mm)	25
22	Gràfica de desplaçament vertical amb desplaçament horitzontal (mm)	25
23	Informació	25
24	Informació de l'assaig	26
25	Dades i resultats de l'assaig	26
26	Transmissió bàsica de dades durant l'assaig	27
27	Diagrama de flux del programa	28
28	Font sense tapa	30
29	Tallant cables	30
30	Interruptor, resistència i LED soldats	31
31	Interruptor, resistència i LED soldats	31
32	Fases de construcció del caixetí, parets enganxades amb pistola termo-segelladora i pintura <i>Chaos black</i>	31
33	Femella i punta de pota	32
34	Fases de l'assemblatge de les fulloles de fusta al motor i la caixa de Casagrande	32
35	Femella i punta de pota	33
36	Distribució normal de les dades de la cèl·lula de càrrega en buit	34
37	<i>Driver</i> industrial [10]	39

Índex de taules

1	Taula d'avantatges i inconvenients assaig de tall directe	12
2	Peces3D	21
3	Pressupost General	35
4	Emissions durant el disseny	36

1 Prefaci

1.1 Origen del projecte

Aquest projecte té com a origen la necessitat de desenvolupar un equip de laboratori per a l'estudiantat de grau d'Enginyeria Civil i Ambiental, concretament, per les pràctiques de laboratori de l'assignatura de Mecànica de Sòls de l'Escola de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC en endavant).

Originalment el disseny i construcció de l'equip estava vinculat a una beca d'aprenentatge UPC. Amb aquesta beca es pretenia impulsar el projecte des d'una part del departament de DECA constituïda per diverses professores i l'estudiant becari. Després de dos anys i amb diversos entrebancs el projecte no es va poder desenvolupar.

El quadrimestre de primavera del 2020 van reobrir la beca i van proposar a l'autor d'aquesta memòria el disseny i construcció de l'equip com a TFG. Aquest va canviar la seva idea inicial de TFG de fer una App per mòbil ja que l'equip de laboratori era més multi-disciplinar (implicava coneixements electrònica, informàtica i mecànica).

1.2 Requeriments previs

El requeriment principal és molt clar. L'equip ha de complir i reproduir una màquina d'assaig de tall directe. És a dir, dues plaques on s'hi situa un material sorrenc entre mig i s'hi efectua un desplaçament de les mateixes per tal d'analitzar el coeficient de fricció i el moviment vertical.

Aquesta condició bàsica està supeditada a d'altres no menys importants. El pressupost no és com el d'una màquina d'assaig real, és inferior. Així com la precisió.

L'equip es farà servir per les pràctiques de laboratori de Mecànica de Sòls al Grau d'Enginyeria Civil. Per tant, no ha de tenir la precisió de nanòmetres com les màquines per realitzar assaigs reals.

Per tal d'entendre els conceptes de resistència de tall i poder desglossar els resultats de les gràfiques de força-desplaçament a nivell d'estudis de Grau, no caldrà tanta precisió. Es buscarà una precisió de mil·límetres amb dos decimals.

Respecte els terminis del projecte existeix una data límit per a què l'equip de laboratori es presenti a un congrés (*International Conference on Geotechnical Engineering Education, GEE 2020*) el juny de 2020 [11].

També hi ha unes especificacions de baix cost i de codi obert que s'introdueixen en els següents apartats de la memòria amb detall.

2 Introducció

2.1 Objectius del projecte

Respecte l'objectiu principal s'agafa com a referència el requeriment principal 1.2.

L'equip de laboratori es pot subdividir en diverses disciplines i de cadascuna se'n poden extreure diferents objectius. Les disciplines són: L'electrònica, la mecànica i la informàtica.

1. Electrònica:
 - Entendre la funció de tots el components electrònics que intervenen en l'equip.
 - Saber muntar els diferents components així com calibrar-los.
2. Mecànica:
 - Comprendre la física que hi ha al darrere de l'experiment.
 - Fer un estudi d'elements finits i de forces de l'estructura que suporta la mostra.
 - Dissenyar i optimitzar totes les peces.
3. Informàtica:
 - Programar una interfície bàsica però útil per a l'estudiant de cara a les pràctiques de laboratori.
 - Dissenyar un codi per a què es grafiï la força i el desplaçament a temps real.

L'objectiu transversal del projecte és seguir una metodologia fàcil de replicar i sobretot gratuïta, és a dir, no fer servir programes de pagament o patents. Per tal d'aconseguir aquesta meta es planteja basar-se en el codi obert. Segons les persones creadores del moviment, John 'maddog' Hall, Larry Augustin, Eric S. Raymond, Bruce Perens i altres participants, l'*Open Source* prové del moviment *Free Software* i n'és una evolució per tal de canviar l'ambigüitat del concepte de programari gratuït. D'aquesta manera (amb el nom *Open Source*), el concepte esdevenia trenca-dor en el sentit del progrés del coneixement. No només és un coneixement gratuït sinó que també és lliure, i com a tal es desenvolupa i flueix de manera contínua.

"El Codi Obert és una forma revolucionària de dissenyar, desenvolupar i distribuir qualsevol cosa. Si bé l'origen històric d'aquest terme està relacionat amb el desenvolupament de programari, actualment s'apliquen en altres àmbits d'activitat, sentim parlar així de maquinari lliure (com és la targeta E/S Arduino), la biotecnologia, la cultura (cultura lliure), la política (democràcia directa) propiciant una revolució vertiginosa cap a un model de societat oberta." [12]

També es planteja que l'equip de laboratori sigui molt fàcil de reparar i amb components i parts modulars per tal de combatre l'obsolescència programable.

2.2 Abast del projecte

L'abast del projecte és l'alumnat del Grau d'Enginyeria Civil i Ambiental en un primer període. En una segona etapa també es planteja fer un manual de construcció per tal que sigui fàcilment replicable i llavors l'abast sigui molt més gran. S'oferirà a plataformes com "instructables" [13]. o pertanyents al moviment DIY. D'aquesta manera altres universitats podran construir l'equip i redissenyar-lo si s'escau. Òbviament, aquest abast tant expansiu és gràcies al disseny basat en codi obert de l'equip.

3 Assaig de tall directe

3.1 Fonament teòric

Juntament amb d'altres experiments com l'assaig de tall triaxial o d'altres que determinen la plasticitat o les granulometries, l'assaig de tall directe és necessari per a l'estudi de la mecànica del sòl. És d'especial importància previ a qualsevol construcció.

L'objectiu principal d'un assaig de tall directe és determinar els paràmetres de cohesió (c') i angle de freg (ϕ') que defineixen la resistència del sòl. Per tal d'assolir els paràmetres hi ha un procediment típic: [1]

1. En una caixa d'acer ², dividida en dues meitats, s'hi introdueix una mostra de sòl.
2. Sobre la mostra s'aplica una càrrega normal (N). Normalment mitjançant càrregues o peses tipus disc de massa precisa i coneguda.
3. Una de les meitats de la caixa és desplaçada horitzontalment, mentre que s'impedeix que l'altra ho faci solidàriament, mesurant la força de reacció (F) necessària per a mantenir-la immòbil.
4. El pla que separa les dues meitats constituirà el pla de tall, i la força de reacció constituirà una mesura de la resistència al tall al llarg d'aquest pla.

A la següent figura es pot observar l'esquema genèric de l'assaig.

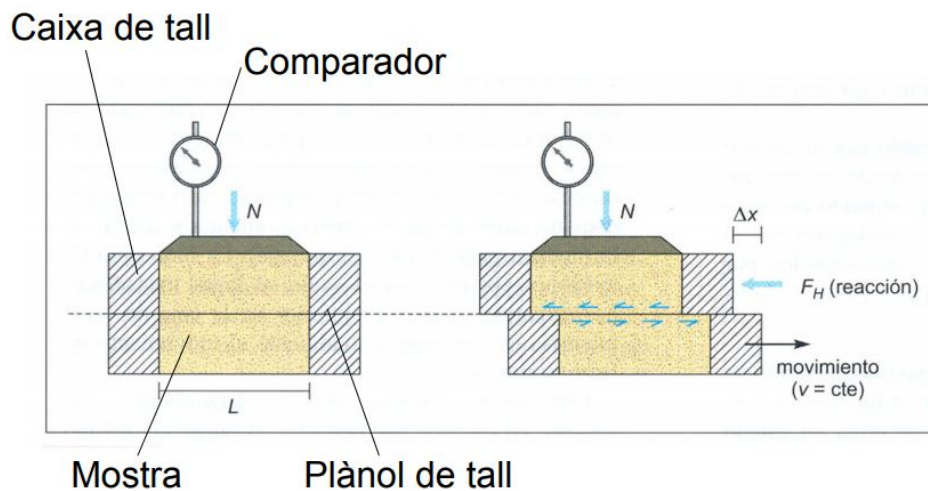


Figura 1: Esquema en alçat de l'assaig de tall [1]

Com a equacions genèriques tenim la tensió normal (1) i la tensió tangencial (2):

²També anomenada caixa de Casagrande o Caixa de tall directe que usualment pot ser quadrada de 60 mm de costat o cilíndrica de 50 mm de diàmetre [14].

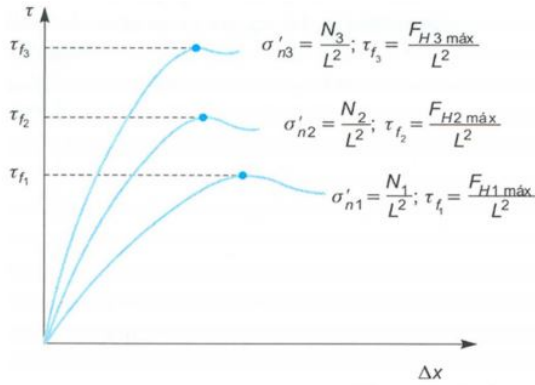
$$\sigma_{n_i}' = \frac{N_i}{L^2} \quad (1)$$

$$\tau_{f_i} = \frac{F_{H_i}}{L^2} \quad (2)$$

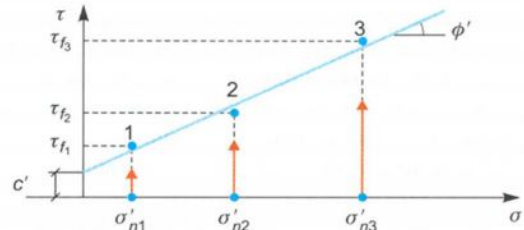
On:

- $\sigma_{n_i}' \rightarrow$ Tensió normal (Pa)
- $N_i \rightarrow$ Força vertical o Normal (N)
- $L^2 \rightarrow$ Area de la mostra (m^2)
- $\tau_{f_i} \rightarrow$ Tensió tallant (Pa)
- $F_{H_i} \rightarrow$ Força Horitzontal (N)

Normalment, aquest assaig es repeteix per a tres càrregues normals diferents i s'hi extreuen tres parells. Seguidament es dibuixen dues gràfiques clau: La gràfica de tensió τ - desplaçament horitzontal Δx (2(a)) i la de tensió tallant τ - tensió normal σ (2(b)).



(a) Tensió tallant en funció del desplaçament horitzontal



(b) Tensió tallant i tensió tangencial

Figura 2: Gràfiques de caracterització [1]

D'aquestes gràfiques s'extreu la cohesió c' i l'angle de freg ϕ construint la recta. Matemàticament, per exemple segons gràfica 2 (b):

$$\phi' = \arctan \left(\frac{\tau_{f3} - \tau_{f2}}{\sigma_{n3}' - \sigma_{n2}'} \right) \quad (3)$$

$$c' = \tau_{f1} - \left(\frac{\tau_{f3} - \tau_{f2}}{\sigma_{n3}' - \sigma_{n2}'} \right) \sigma_{n1}' \quad (4)$$

On:

- $c' \rightarrow$ és la cohesió i significa la màxima resistència tangencial en un pla qualsevol quan la tensió normal sobre ell és nul·la.
- $\phi' \rightarrow$ és l'angle de freg o de fricció interna efectiu. Determina el pendent de la recta de trencament (veure Figura 3).

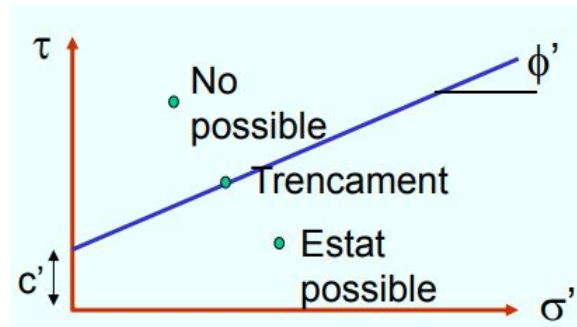
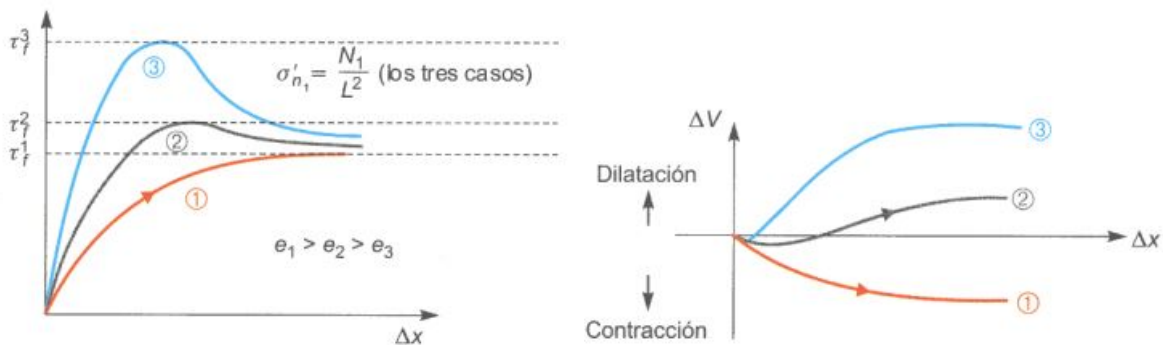


Figura 3: Gràfica tensió tangencial - tensió normal amb recta de trencament. [1]

3.1.1 Comportament teòric de sòls granulars assajats a tall directe

Suposant un assaig de tres mostres del mateix material compactades de manera diferent, és a dir, amb diferents densitats relatives, s'obtenen les següents gràfiques.



(a) Tensió tallant en funció del desplaçament horitzontal (b) Increment de volum i Desplaçament horitzontal

Figura 4: Gràfiques d'anàlisi [1]

On e_1 , e_2 i e_3 és una mesura relativa entre el volum d'espai buit (els porus) i el volum de partícules sòlides que hi ha en un cert volum format pel material. S'anomena índex de porus, *índice de poros* en castellà o *void ratio* en anglès:

$$e = \frac{\text{volum de porus}}{\text{volum de partícules sòlides}} \quad (5)$$

Si e és gran vol dir que hi ha molts buits, i per tant el material és més “solt”. En aquest cas, entre altres coses, el material és molt deformable i menys rígid, el diagrama tensió-deformació (de tall 4(a)) és monòton creixent i mostra contractància (que vol dir que el material disminueix de volum quan li és aplicat un esforç de tall). Seria el cas de la mostra (1) a les gràfiques d'anàlisi 4, que té l'índex de porus més gran de les tres.

Si e és petit vol dir que hi ha pocs buits, i per tant el material és més “compacte”. En aquest cas, entre altres coses, el material és poc deformable i més rígid, presenta un pic en el diagrama tensió-deformació (de tall 4 (a)) i mostra dilatància (que vol dir que el material augmenta de volum quan li és aplicat un esforç de tall). Seria el cas de la mostra (3) a les gràfiques d'anàlisi 4, que té l'índex de porus més petit de les tres.

La mostra (2) representaria un cas entremig, mostrant que el comportament dilatant/contractant depèn bàsicament de l'índex de porus (o de la densitat relativa).[15]

L'índex de porus està relacionat amb la densitat relativa de la manera següent:

$$D_{rel} = \frac{e_{màxim} - e_{real}}{e_{màxim} - e_{mínim}} \quad (6)$$

On:

- $e_{màxim} \rightarrow$ indica l'estat més solt possible.
- $e_{mínim} \rightarrow$ indica l'estat més compacte possible.
- $e_{real} \rightarrow$ és el valor de l'índex de porus real que presenta el material en el seu estat natural i que podem determinar mitjançant assaigs de laboratori SPT (Standard Penetration Test).
- $D_{rel} \rightarrow$ es troba comprès en el rang entre 0 i 1 o entre el 0% (l'estat més solt possible) i el 100% (l'estat més compacte possible).

També es pot definir **l'estat crític** on la tensió és màxima i a partir d'aquell moment la mostra no experimenta canvi de volum. En aquest context també queda definida la **densitat crítica**, compacitat per la qual la mostra no experimenta increment de volum durant el tall.

3.1.2 Modalitats d'assaig en funció de la velocitat

En funció de la velocitat de desplaçament d'una de les parts es poden dividir:

- Assaig no consolidat i no drenat: Comença directament el tall quan s'aplica la càrrega.
- Assaig consolidat i no drenat: S'aplica càrrega vertical després d'haver inundat la mostra. Aquesta actua durant un període de temps (24 h) abans d'aplicar els esforços tallants.
- Assaig consolidat i drenat: En aquest cas l'aigua pot drenar-se. Gràcies a la velocitat de tall que és molt baixa, les possibles pressions intersticials que es podrien generar a l'hora d'aplicar els esforços tallants tenen prou temps per a dissipar-se.

3.1.3 Modalitats d'assaig en funció de l'esforç horitzontal

- Assaig de tensió controlada: es mesuren les deformacions mentre s'hi aplica un esforç horitzontal fins a l'estabilització. Seguidament es tornen a mesurar les deformacions mentre s'incrementa l'esforç. Es repeteix successivament fins que les deformacions no s'estabilitzen llavors significa que el sòl ha trencat.
- Assaig de deformació controlada: Mentre la placa mòbil es desplaça amb una velocitat constant els esforços es van mesurant.

3.1.4 Avantatges i inconvenients

Taula 1: Taula d'avantatges i inconvenients assaig de tall directe

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Barats i ràpids (4 dies consolidat i drenat, unes hores assaig no consolidat i no drenat). • Conceptualment és molt simple. • La preparació de mostres és senzilla. • Utilitzant un tipus d'assaig de gran recorregut de la caixa, o amb mesura de tensions en tots dos sentits, es pot mesurar molt bé la resistència al tall residual dels sòls. 	<ul style="list-style-type: none"> • La superfície de trencament és forçada. • La distribució de tensions en la superfície de tall no és uniforme. • No es mesuren pressions intersticials. • L'àrea del plànol de tall disminueix en progressar l'assaig. • Tendeix a subestimar els angles de fricció (aproximadament uns 2°).

3.2 Exemples pràctics i assaigs reals

Existeixen altres assaigs de tall com l'assaig de tall gegant o l'assaig de tall in situ.

En el primer assaig amb caixes de grans dimensions (fins a un metre) es poden assajar materials granulars de fins a 20 cm de diàmetre equivalent. La càrrega vertical constant pot ser de fins a 100 t. Per tant, la càrrega horitzontal també serà de 100 t.

En el segon cas, el nom "in situ" indica que és un assaig per poder-se fer allà on s'ha extret la mostra. S'aplica a sòls i roques i és anàleg dels assaigs de laboratori. Un marc metàl·lic envolta el bloc i a la vegada està enganxat al bloc amb morter de ciment. Un gat hidràulic es situa a la part inferior i un altre al costat.

3.3 Assaig del projecte

En el cas del projecte a què fa referència aquesta memòria el tipus d'assaig en funció de la velocitat és no drenat i no consolidat, és a dir, el tall començarà just quan s'aplica la càrrega vertical. Respecte l'assaig en funció de l'esforç horitzontal es pretén anar mesurant els esforços així com el desplaçament i grafiant les tensions. Tot i això aquest assaig ha de poder fer-se en poques hores per tal de ser una pràctica de Laboratori.

4 Disseny de l'equip

Per tal de no començar de zero i tal com s'ha explicat en els apartats 1.1 i en 1.2, el projecte ha de complir unes especificacions de baix cost. Aquest projecte s'ha basat en un pre-disseny proposat pel departament de DECA secció d'enginyeria del terreny, concretament per la professora Mercedes Sondon, que es pot apreciar a la figura següent:

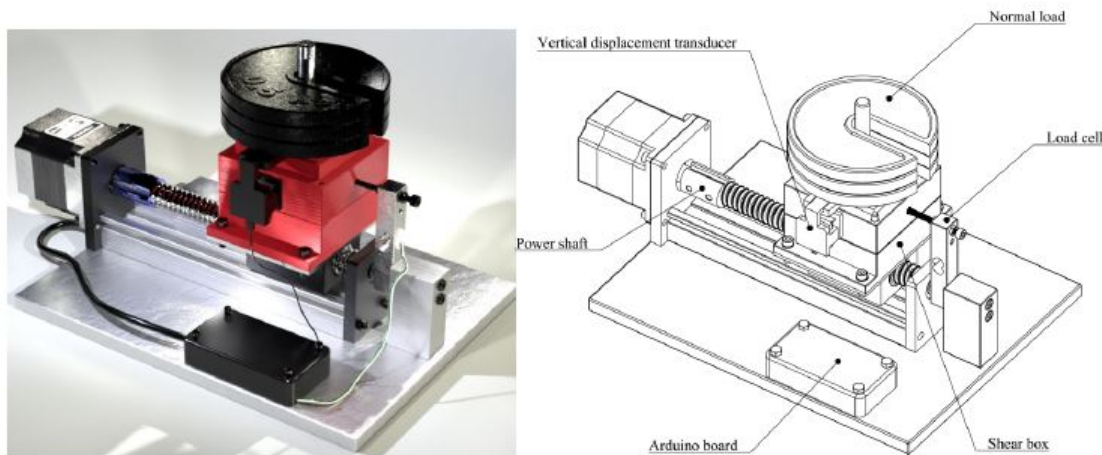


Figura 5: Disseny preliminar renderitzat [2]

En l'esquema de la figura 5, dins el caixetí vermell és on es col·loca la mostra del sòl a analitzar. Sobre d'aquest s'hi posa el pes. Seguidament es pot continuar amb el procediment de l'experiment explicat a l'apartat 3.1.

Per tal d'entendre aquest disseny peça per peça s'ha desenvolupat un esquema que es pot apreciar a la figura 6. Aquest esquema està constituït per diferents elements que tenen diferents funcions:

- **Arduino:** encarregat de recollir dades dels seus pins digitals, processar-les i enviar-les a l'ordinador.
- **Ordinador (PC):** crear la interfície gràfica en temps real de l'experiment i actuar com a centre de control (velocitat, escales, precisió...etc).
- **Motor pas a pas:** és l'element electromecànic del circuit. Desplaça una part de la mostra mentre una altra es queda fixa.
- **Mòdul 3 (Driver):** controla la velocitat del motor.
- **Cèl·lula de càrrega:** adquireix les dades de força en forma de diferència de voltatge. Aquesta diferència és generada pel canvi en la resistència de la galga extensomètrica deguda a la deformació del material. Es troba col·locada per una banda fixa a la base i per l'altra enganxada a la part mòbil.
- **Mòdul 2:** és un convertidor i amplificador, converteix i regula la diferència de voltatge generada per la cèl·lula de càrrega. Concretament, s'encarrega de convertir la lectura analògica a digital amb un convertidor A/D intern (l'HX711 té un convertidor de 24 bits).

- **Sensor d'efecte Hall:** detecta un camp magnètic, un imant en el cas de l'equip. D'aquesta manera mesura la distància vertical en la que es desplaça la mostra.
- **Mòdul 1:** converteix i regula la diferència de voltatge generada pel sensor d'efecte Hall és un .

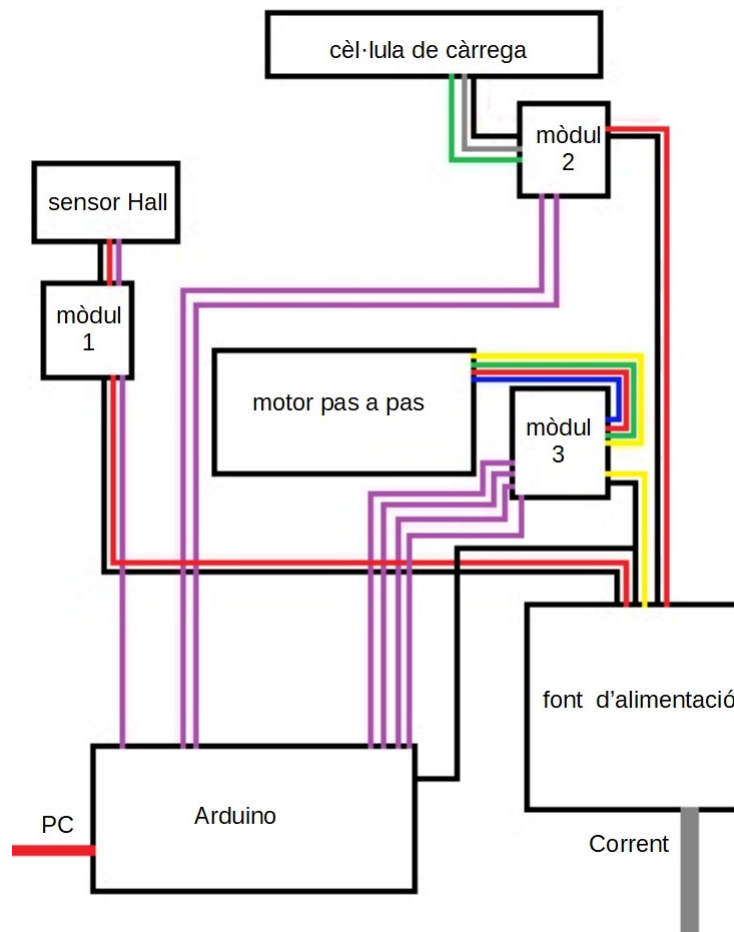


Figura 6: Esquema components de l'equip

En aquest esquema (figura 6) s'hi distingeixen diferents colors pels diferents voltatges dels dispositius que s'expliquen en els següents punts (5.1).

5 Electrònica

5.1 Components electrònics

Tots els components de l'esquema (rectangles de la figura 6) es poden considerar components electrònics o sistemes electrònics de potència. Per una banda estant formats per elements passius com LEDs, resistències o condensadors, i alhora per elements actius com transistors o circuits integrats. Tot i que també hi ha un element electromecànic (el motor pas a pas) que amb la inducció de les bobines de l'estator fa girar el rotor. [16]

5.1.1 Font d'Alimentació

La font d'alimentació és un sistema electrònic de potència [17] des del punt de vista electrònic. Constituit per vàries bobines que configuren transformadors i transistors que regulen els diferents voltatges. El model utilitzat és una font d'ordinador (Seasonic SSP-300TGS Active PFC – 300W). Aquesta proporciona voltatges de: 3.3V (cable taronja), 5V (cable vermell), 5V *standby* (cable lila), 12V (cable groc), -12 V (cable blau) i 0V o "massa" (cable negre). A més, té el cable verd a mode d'indicador d'encesa [18].



Figura 7: Font d'alimentació [3]

5.1.2 Arduino MEGA

Arduino és una placa d'un circuit imprès. Es basa en codi obert i té un microcontrolador on l'usuari pot gravar-hi ordres. El llenguatge que s'utilitza és molt semblant al C++ i l'entorn es diu Processing. Arduino es pot utilitzar per desenvolupar objectes connectat a l'ordinador (com a font i com a connexió per l'intercanvi de dades) o per fer-ne d'altres interactius autònoms. Hi ha varis models amb diferents microprocessadors i nombre de pins digitals i analògics. [19] [20].

En el cas del projecte s'ha fet servir un Arduino-MEGA, "mega" ja que és el que té més connexions digitals (53 en total) i més voluminós. Tot i això, no s'ha escollit pel seu volum ni pel nombre de connexions però sí pel seu tamany de memòria flash (per guardar les dades) i per la seva mida de SRAM. La memòria flash és fins a 8 vegades més gran que a un Arduino UNO i la memòria SRAM 4 vegades més. És per aquest motiu i per la precisió que es busca en el dispositiu que s'ha decidit adquirir un Arduino-MEGA.



Figura 8: Arduino MEGA [4]

5.1.3 Sensor d'efecte Hall i mòdul 1

El sensor d'efecte Hall és un dispositiu electrònic que si està connectat al corrent i s'hi aproxima un camp magnètic fluïnt en una direcció concreta respecte al sensor, llavors aquest crea un voltatge proporcional al producte de la força del camp magnètic i del corrent. [21] D'aquesta manera, entre d'altres utilitats, es pot determinar la posició d'un element (imant) respecte un altre que porti acoblat el sensor.

Per al dispositiu de laboratori que tracta aquesta memòria, aquest component es farà servir per determinar la posició mitjançant un mòdul tot i que també pot funcionar sense el mòdul. Concretament els components són: el sensor i el mòdul 1 (figura 6). Aquests dos components configuren el dispositiu VMA313 [22] que és fàcilment controlable i connectable amb Arduino.

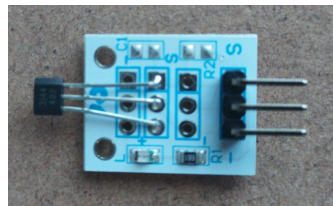


Figura 9: Sensor soldat al mòdul 1

5.1.4 Cèl·lula de càrrega i mòdul 2

Una cèl·lula de càrrega és un element electromecànic que aconsegueix convertir una informació de força o tensió a una diferència de voltatge [23]. Això és possible gràcies a les galgues extensomètriques. Tal com es pot veure a la figura 10 hi ha diverses galgues incrustades (s'aprecia on hi ha cola de color blanc).

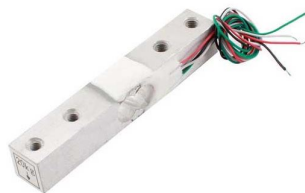


Figura 10: Cèl·lula de càrrega [5]

El funcionament d'una galga depèn de diverses informacions. Aquest també dependrà del material on s'hi situï, en aquest cas, alumini.

És per això que és necessari un mòdul per filtrar aquesta informació abans d'enviar-la a l'Arduino. Aquesta és la funció del mòdul 1 (HX711): convertir el senyal analògic a digital mitjançant un convertidor A/D intern de 24 bits. [24]

5.1.5 Motor pas a pas i mòdul 1 (*driver*)

El motor pas a pas és una màquina elèctrica [25] de corrent altern síncron [26]. Converteix l'energia elèctrica en mecànica i fa girar l'eix del motor un angle determinat [27]. Aquesta màquina síncrona sense escombretes es caracteritza per ser molt precisa [26].

El motor de l'equip és un motor pas a pas de tipus bipolar. A nivell electrònic resulta un element passiu ja que només són bobines. Quan per aquestes hi circula un corrent indueixen un camp magnètic des de l'estator que fa girar un imant permanent (rotor). Aquest es voldrà alinear amb el camp magnètic i girarà, convertint-se així en un element electromecànic. [28] [6]

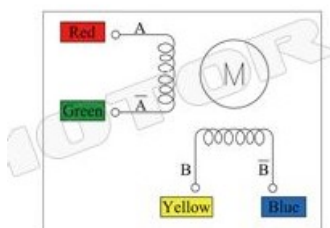


Figura 11: Motor pas a pas, esquema bobines interiors [6]

Per a l'equip ja s'ha adquirit un motor pas a pas collat a un cargol sense fi. Aquest suporta un caixetí que es desplaça per una guia a mesura que avança el pas del cargol que fa girar el motor. Veure figura 12.



Figura 12: Motor pas a pas collat a cargol i guia. [7]

El mòdul 1 o *driver* parlant en termes d'electrònica de potència [29] és el dispositiu que s'encarrega del processament d'energia elèctrica. És a dir, rep l'energia de la font i segons estigui programat farà unes accions o unes altres determinant així diferents corrents a les bobines del motor i per tant fent-lo girar a diferents velocitats [8].

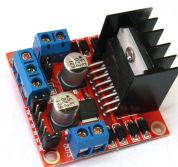


Figura 13: Mòdul 1 o *Driver* [8]

6 Mecànica

Un dels tres pilars fonamentals del projecte que s'exposa en aquesta memòria és la mecànica. Aquesta part consisteix en l'anàlisi mecànic de l'estructura dissenyada per la Mercedes Sondón per posar-hi la mostra amb les directrius de la norma UNE 103401 [14].

Per tal de crear punts fixes que després s'utilitzaran al diagrama de forces, s'han utilitzat cargols de diferents mètriques (M4 i M5, tal com s'especifica en el pressupost 3).

6.1 Diagrama de forces

6.1.1 Definició del sistema

El sistema que s'estudiarà és el de la sorra a l'interior de la caixa entesa com un sòlid rígid. La referència utilitzada serà el terra.

6.1.2 Mecànica estàtica: Dimensionament del motor just en el moment d'arrencada

Fent servir les següents fórmules es calcula si el motor pot generar el parell necessari per moure la caixa de Casagrande plena i amb les peses.

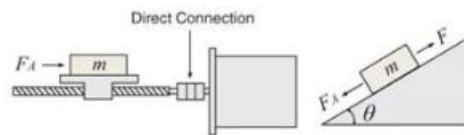


Figura 14: Esquema de forces genèric [9]

$$T_L = \left(\frac{F \cdot P_B}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 \cdot F_0 \cdot P_B}{2\pi} \right) \cdot \frac{1}{i} \quad (7)$$

$$F = F_A + mg(\sin(\theta) + \mu\cos(\theta)) \quad (8)$$

- $F \rightarrow$ Força amb direcció i sentit del moviment (en estàtica valdrà 0).
- $F_A \rightarrow$ Força externa exercida per la part fixa (serà diferent a 0 en dinàmica).
- $F_0 \rightarrow$ Pre-càrrega.
- $m \rightarrow$ massa total de la caixa i la mostra
- $\mu_0 \rightarrow$ coeficient de fricció interna. (0.1 ~ 0.3)
- $\eta \rightarrow$ rendiment (0.85 ~ 0.95)
- $P_B \rightarrow$ Pas de rosca
- $\theta \rightarrow$ angle del pendent.
- $\mu \rightarrow$ coeficient de fricció de la superfície que llisca (0.05)

- $g \rightarrow$ gravetat (9.81 m/s^2)
- $i \rightarrow$ relació de transmissió

S'ha suposat que el motor NEMA 23 estava ben escollit i podia assumir les condicions de treball de l'experiment fins ara. En aquest apartat s'ha volgut demostrar que la potència elèctrica consumida pel motor pas a pas i la potència mecànica que pot generar són suficients per assolir les condicions de l'experiment. Partint de les equacions (7), (8) i d'altres hipòtesis (com les condicions de l'experiment) la potència mecànica del motor hauria de ser suficient per fer moure la massa de l'experiment a la velocitat indicada.

Potència elèctrica consumida pel motor

$$V = 24\text{-}36 \text{ V}$$

$$I = 2.8 \text{ A}$$

$$P_{min} = V \cdot I = 67.2 \text{ W} = P_{consumida}$$

Potència elèctrica que es transforma en mecànica

Partint de les dades de la fitxa tècnica del motor pas a pas [6] i de les fórmules de màquines elèctriques per un motor de corrent contínua. S'han extret les dades per calcular la potència útil. Generant el següent problema.

$$P_{til} = P_{consumida} \cdot P_{perduda}$$

$$E_g \cdot I_i = E_b \cdot I_i - R_i \cdot I_i^2$$

$$E_g = n \cdot K\phi$$

$$n = \frac{E_b - R_i I_i}{K\phi}$$

on,

- $E_g \rightarrow$ força contra electromotriu
- $E_b \rightarrow$ tensió en els borns, 24 V
- $R_i \rightarrow$ resistència de l'induït, 0.9ω
- $I_i \rightarrow$ corrent de l'induït
- $n \rightarrow$ rpm del motor
- $K\phi \rightarrow$ excitació.

Suposant un rendiment del 80% la potència útil és d'un 53.76 W

Potència Mecànica necessària

$$P = F_{total} \cdot v$$

Les condicions imposades a l'experiment permeten solucionar el problema:

- El pas de rosca és de 4.73 mm = 0.00473 m
- Si es fan 3 voltes amb 105 segons la velocitat angular és de 1.71 rpm
- La distància a efectuar són 14.19 mm = 0.01419 m
- La velocitat lineal en la direcció de l'eix és de 0.135 mm/s = $1.35 \cdot 10^{-4}$ m/s
- massa total = massa de les peses + massa de la caixa de Caixagrande + massa de la mostra = per exemple 3kg de pesa + 0.134 + per exemple 0.190 de mostra = 3.33 kg

Per tant la força i potència necessàries que haurà de fer el motor com a mínim és de :

$$F = 3.33 \cdot 9.81 \cdot \cos(0) \cdot 0.05 = 1.63N$$

$$P_{necessaria} = F \cdot v = 1.63 \cdot 1.35 \cdot 10^{-4} = 2.20375 \cdot 10^{-4}W$$

Fent servir 7 es pot saber el parell i acotant amb el rendiment i la velocitat saber si és factible.

$$T_L = 1.534 \cdot 10^{-3} N \cdot m = 1.51 \cdot kg \cdot cm$$

Segons la fitxa tècnica el motor pot desenvolupar fins a 12.6 kg·cm per tant la situació de l'experiment en estàtica es troba dins de les condicions de contorn.

Teorema del moment cinètic en equilibri

$$\sum M_{ext} = 0$$

en estàtica en el punt G.

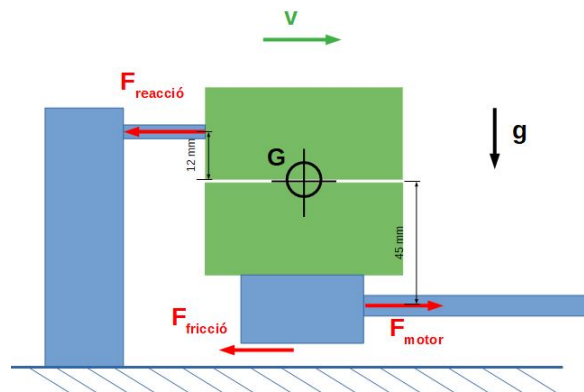


Figura 15: Esquema de forces

Durant l'experiment la caixa experimenta un moment extern en sentit antihorari. Ja que la Força de reacció i la Força del motor en sentits oposats i a distàncies diferents del centre de masses generaran un moment resultant que absorbiran els cargols del suport de la base/fusta i els cargols de les fulloles de fusta al motor. S'hauria d'analitzar fins a quin punt la força de fricció (petita) pot compensar aquest dèficit i mantenir l'equilibri.

6.2 Peces impreses en PETG

Per la impressió de peces 3D es va contactar amb *MakersBcn* [30] que han imprès les peces amb bastanta rapidesa i s'han adaptat a les necessitats del projecte. Les peces s'han imprès a diferents densitats segons la importància de la precisió en què havien de ser fabricades o la força que havien de suportar. Així ho exposa la taula següent:

nom peça	massa (g)	factor de densitat (%)	massa final (g)	sotmesa a tensions
caixa base	148.08	0.25	37.02	No
caixa sup mod	38.85	0.25	9.7125	No
placa sup	38.27	0.25	9.5675	No
suport mod	23.92	0.4	9.568	Si
suport dil	2.85	0.25	0.7125	No
suport imant	3.75	0.25	0.9375	No
suport peses	14.23	0.4	5.692	Si
suport lc	44.60	0.4	17.84	Si
suport sens	5.29	0.25	1.3225	No

Taula 2: Peces3D

La decisió de les densitats de les peces concretament el 25% i el 40% van venir directament recomanades pel tècnic i pel bon funcionament de la impressora 3D. Es va decidir fer les peces que requerien més precisió a un 25% i les que requerien més esforços (a priori) a un 40%. Com s'ha pogut veure en l'anàlisi de moments la peça anomenada "caixa base" absorbeix un moment extern generat per les forces i que acaba als cargols que la fixen amb el motor i aquests transmeten el moment a la base.

7 Informàtica

S'ha dissenyat una app bàsica o programa mitjançant l'editor *Sublimetext* i Python3. S'ha utilitzat les llibreries de *pyserial*, *tkinter*, *openpyxl*, *scipy*, *numpy*, *matplotlib*, *math* i *datetime*. Veure codi a l'Annex A.

Les llibreries han sigut utilitzades per els següents objectius:

- **Pyserial** → Transmissió de Dades d'Arduino a Python.
- **Tkinter** → Creació de la interfície.
- **Openpyxl** → Creació i connexió amb fulla de càlcul.
- **Scipy** → Accés a mètodes de resolució d'equacions no lineals.
- **Numpy** → utilització de funcions trigonomètriques predefinides.
- **Mathplotlib** → utilització d'eines per graficar funcions.
- **Math** → utilització de variables matemàtiques com el nombre com π .
- **Datetime** → control del temps de l'experiment.

7.1 Funcionament del Programa

De manera molt bàsica l'usuari pot entendre el funcionament de la pràctica amb 3 pantalles que són les següents:

1. A la primera pantalla la persona usuària ha d'introduir el seu nom i la seva categoria dins d'uns quadres de text. També ha de llegir les comprovacions que cal realitzar per preparar l'experiment així com la mostra. Un cop fet això pot clicar "Iniciar".

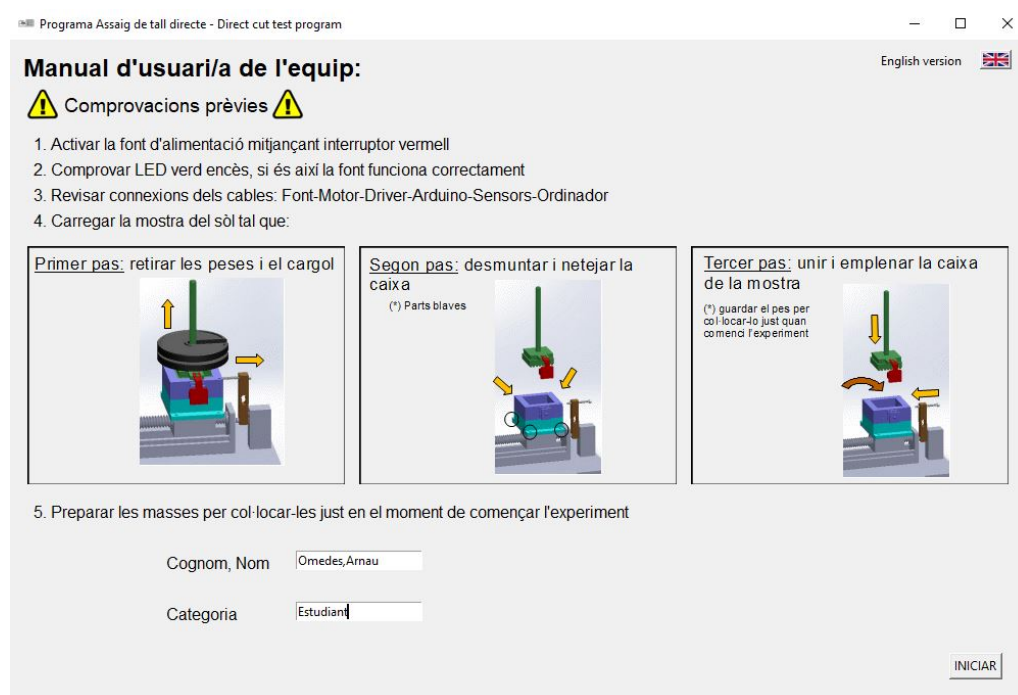


Figura 16: Captura de pantalla de la pestanya 1

2. La segona pestanya permet definir el paràmetre de la massa que es col·locarà sobre la mostra (Força vertical). Aquest paràmetre crida una funció que calcula la tensió normal mitjançant la fórmula 1. L'estudiant pot anotar els paràmetres de l'experiment i ha de recordar la importància de reiniciar un cop finalitzat.

Manual d'usuari/a de l'equip:

Paràmetres de l'experiment

Força (N)

☐ 9.81 N
☐ 19.62 N
☐ 49.05 N

La velocitat de l'experiment és de _____ 1.7143 rpm

La distància horitzontal recorreguda per la part mòbil de la Caixa de Casagrande és de _____ 14.1900 mm

La Caixa de Casagrande amb superfície de costat _____ 49.7000 mm

Quan cliquis 'INICIAR':

- Començarà l'experiment que durarà uns 105 segons i no es podrà parar.
- Es crearà un fitxer tipus fulla de càlcul anomenat Dades.
- En una fulla (assaig) es guardaran les dades base de l'experiment així com el nom de l'usuària i categoria.
- En altra fulla (resultats) es graficarà la Força horitzontal i el desplaçament vertical a la mostra respecte el temps.
- També s'obrirà una altra pestanya on podràs consultar les tensions i les gràfiques de Força i Desplaçament.

IMPORTANT: clicar 'REINICIAR' quan acabis de revisar les gràfiques perquè la mostra torni a la posició inicial.

INICIAR

Figura 17: Pestanya 2

Manual d'usuari/a de l'equip:

Paràmetres de l'experiment

Força (N)

☐ 9.81 N
☒ 19.62 N
☐ 49.05 N

Has seleccionat 19.62 N la tensió normal es calcularà a partir d'aquest valor

La velocitat de l'experiment és de _____ 1.7143 rpm

La distància horitzontal recorreguda per la part mòbil de la Caixa de Casagrande és de _____ 14.1900 mm

La Caixa de Casagrande amb superfície de costat _____ 49.7000 mm

La tensió normal és de _____ 7943.0304 Pa

Quan cliquis 'INICIAR':

- Començarà l'experiment que durarà uns 105 segons i no es podrà parar.
- Es crearà un fitxer tipus fulla de càlcul anomenat Dades.
- En una fulla (assaig) es guardaran les dades base de l'experiment així com el nom de l'usuària i categoria.
- En altra fulla (resultats) es graficarà la Força horitzontal i el desplaçament vertical a la mostra respecte el temps.
- També s'obrirà una altra pestanya on podràs consultar les tensions i les gràfiques de Força i Desplaçament.

! IMPORTANT: clicar 'REINICIAR' quan acabis de revisar les gràfiques perquè la mostra torni a la posició inicial.

INICIAR

Figura 18: Pestanya 2 amb la força vertical seleccionada

3. Un cop la usuària clica "INICIAR" abans d'obrir-se la última pestanya de resultats i gràfiques, apareix el següent *warning*:

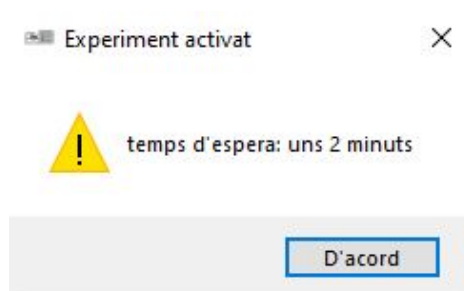


Figura 19: Advertència

Després d'uns 2 minuts, s'inicialitza la tercera pestanya, referent a gràfiques de resultats. En aquesta pestanya es poden consultar les gràfiques de la Força horitzontal i del desplaçament. També és important que s'ha de reiniciar l'experiment un cop acabada la consulta, així el motor torna a la posició inicial.

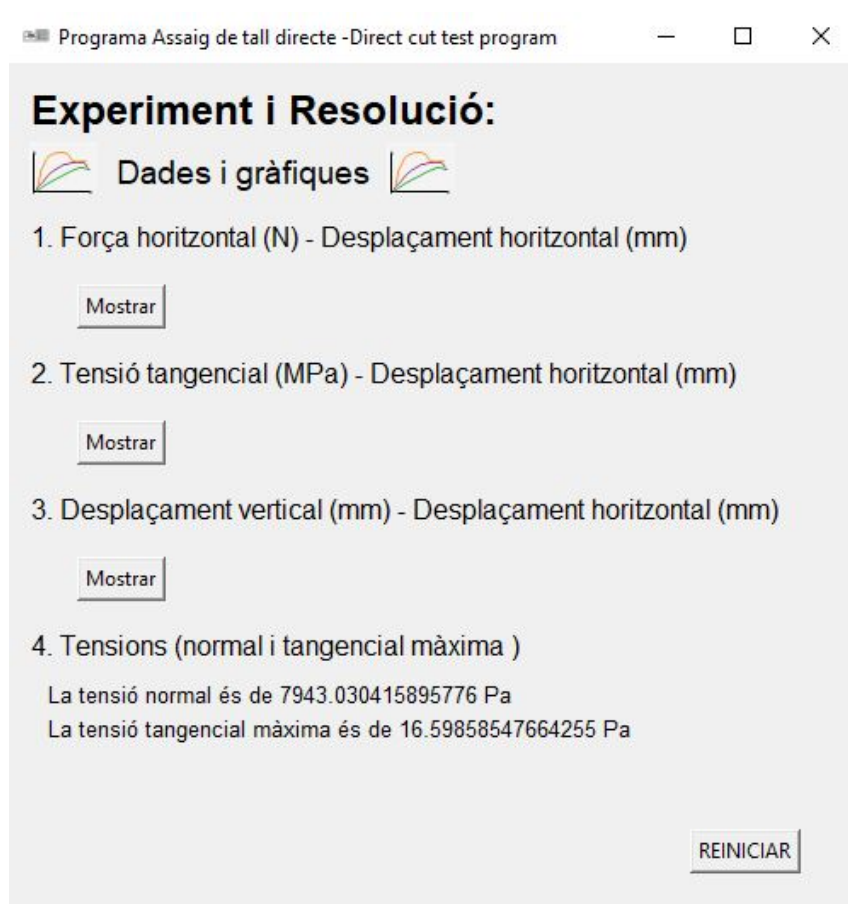


Figura 20: Tercera pestanya

Si clic a "Mostrar" s'obtenen unes gràfiques de l'estil següent:

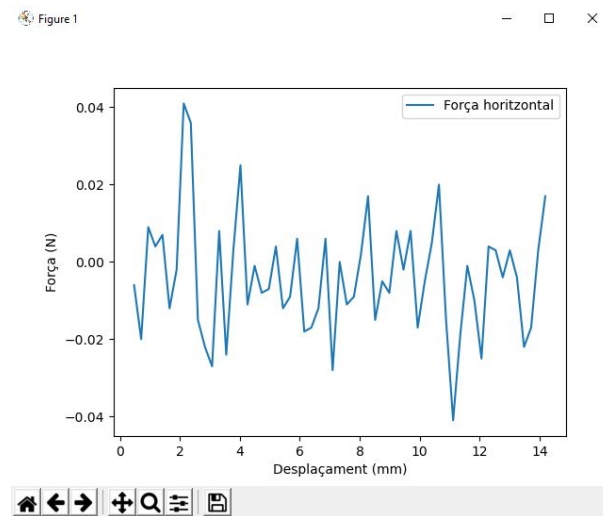


Figura 21: Gràfica de Força (N) amb desplaçament horitzontal (mm)

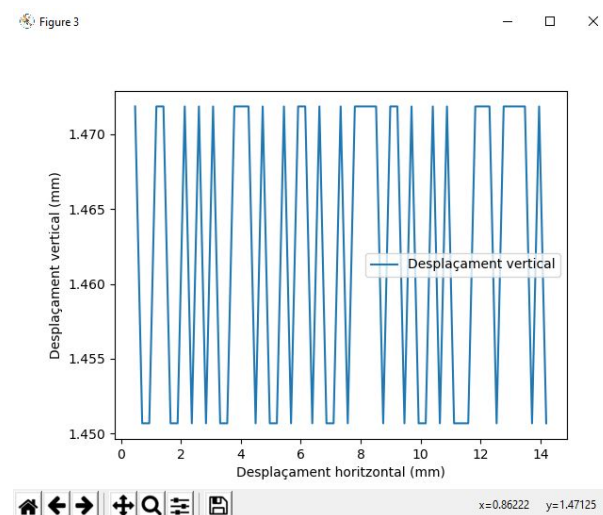


Figura 22: Gràfica de desplaçament vertical amb desplaçament horitzontal (mm)

Si la usuària clic a "Reiniciar" apareix una pestanya informativa com la següent:

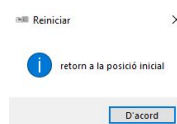


Figura 23: Informació

Aquesta pestanya informa que el motor tornarà a la posició inicial. Realment crida una funció que fa que el motor faci les mateixes voltes en sentit invers al de l'experiment.

4. Paral·lelament el programa crea un fitxer tipus fulla de càlcul on emmagatzema les dades de l'experiment en funció del temps i les grafia. Tal com es pot apreciar en les següents figures:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Nom	Ombres Altes												
2	Categoria	Eutrofia												
3														
4	Força Vertical (N)	19.42												
5	Velocitat (m/s)	1.7142857												
6														
7	Distància (mm)	1.00478109761885												
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34														
35														

Figura 24: Informació de l'assaig

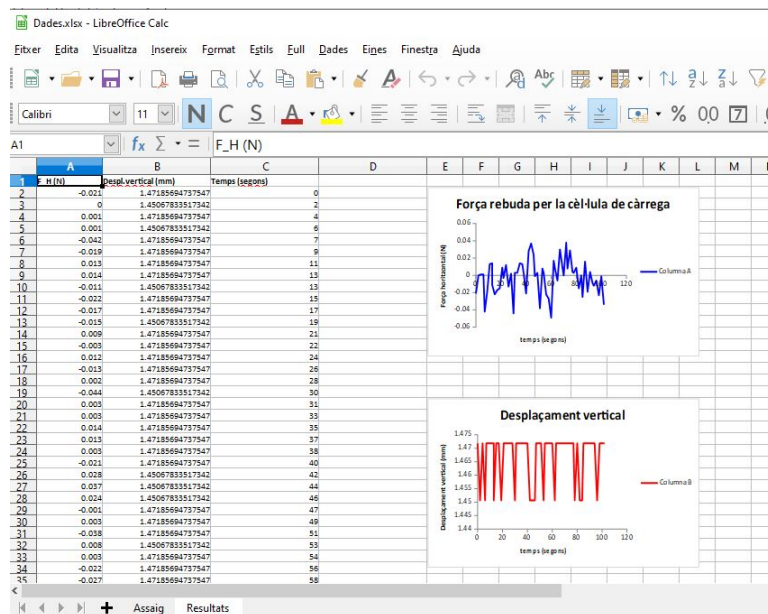


Figura 25: Dades i resultats de l'assaig

7.2 Comunicació i transferència de dades

Les dades són preses pels sensors en format analògic i en el cas de la cèl·lula de càrrega són filtrades pel mòdul HX711. Tal com s'ha dit en la introducció d'aquesta secció d'Informàtica, la llibreria Pyserial és la que permet cridar funcions relatives a la connexió amb l'Arduino des del codi de Python.

Les dades es transfereixen de la següent manera:

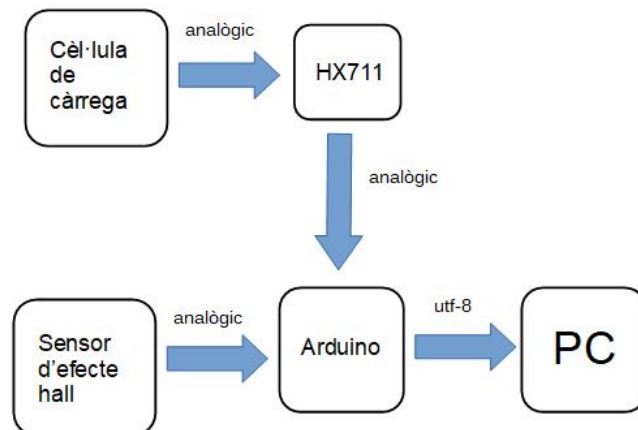


Figura 26: Transmissió bàsica de dades durant l'assaig

La descodificació escollida ha sigut UTF-8 (*8-bit Unicode Transformation Format*). Tot i que pels caràcters de les llengües de l'Est d'Europa o Amèrica és gairebé igual al mètode ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), s'ha preferit ser coherent amb el mètode universal i poder tenir una visió de futur d'implementació del programa en altres llengües.

S'ha de tenir en compte que la codificació d'alguns caràcters amb UTF-8 implica 2 bytes o més i això afecta a la rapidesa del procés. Enfront l'ASCII que segueix la ISO-8859 i només caldria un byte.

7.3 Diagrama de flux

El següent diagrama de flux explica de manera esquemàtica el funcionament del programa. Per més informació consultar codi de Python o *sketch* d'Arduino a l'Annex.

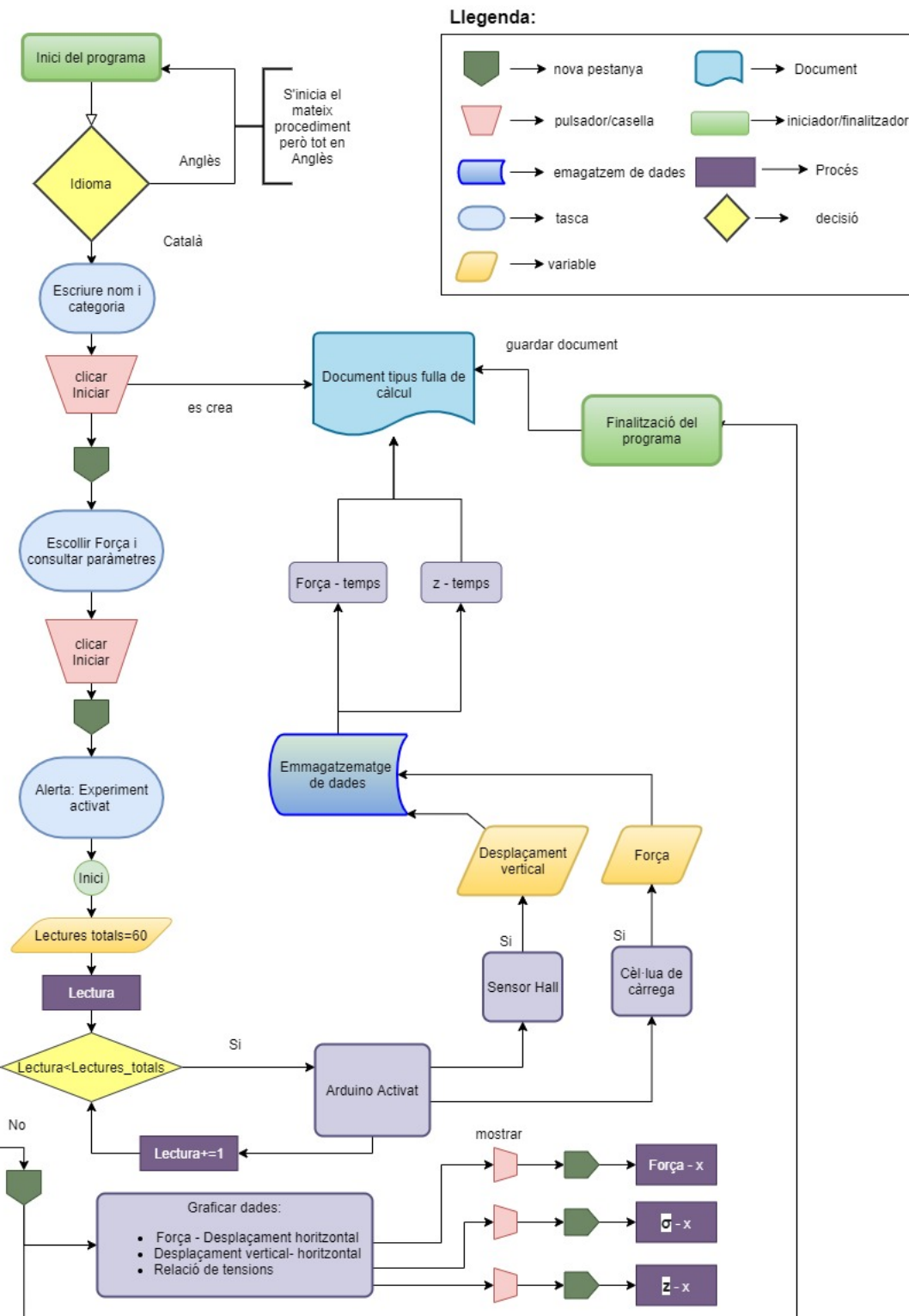


Figura 27: Diagrama de flux del programa

8 Prototip

Finalment, un cop explicades i dissenyades les diferents parts de l'equip es passa a fer una proposta de disseny final o prototip. Aquesta passa també per calibrar els sensors així com fixar el motor al suport. Tots els plànols de les peces impreses es troben a l'Annex B.

8.1 Components

Els components del prototip són:

- | | |
|---|--|
| 1. Motor pas a pas - Nema 23 2A | 13. Arduino Mega 2560 |
| 2. Font d'alimentació - Seasonic SSP 300TGS Active PFC 300W | 14. cable impresora - USB A to B |
| 3. Cable d'alimentació - Baohning Gtsa-3 N14586 | 15. HY-DIV268N |
| 4. Interruptor 250Vac | 16. Resistència 1k Ω |
| 5. 2 LED verds | 17. Sensor Hall - 49E |
| 6. 20 cables mascle-mascle o mascle-femella | 18. Sensor Hall - A3144 + mòdul |
| 7. Placa per realitzar connexions (<i>Protoboard</i>) | 19. Cèl·lula de càrrega i mòdul HX711 |
| 8. peces impreses amb 3D | 20. Convertidor 120W 12DC-24DV 5A |
| 9. puntes de potes de taula o cadira | 21. 4 Cargols, 4 volanderes i 4 femelles tipus M4 de 16 mm |
| 10. Lleixa d'estanteria de 250 x 600 x 10 mm | 22. 4 Cargols tipus rosca M4 de 20 mm |
| 11. cola ultra-resistent tipus Hloctite" | 23. 4 fulloles de fusta de 30 x 15 x 3.5 mm |
| 12. 2 imants | 24. fulla de poliestirè expandit 100 x 100 mm |
| | 25. cinta aïllant |

8.2 Eines

Eines emprades en la construcció del prototip són:

- | | | |
|--------------------------------|--|-------------------------|
| • Alicates | • Serra manual | • Peu de Rei electrònic |
| • Tornavís de punts d'estrella | • Tisores | • Multímetre |
| • Tornavís de punta plana | • Martell | • Claus Allen |
| • Soldador i estany | • Comgrow Creality Ender 3 Impressora 3D Alumini | • Lima |

8.3 Construcció final del prototip

8.3.1 Preparació prèvia dels components:

Hi ha components que han requerit una preparació prèvia com la font o l'acoblament d'algunes peces impreses abans d'assemblar-les al motor o a d'altres parts.

Font

Per tal de preparar la font s'han seguit els següents passos:

1. Preparació de les eines:

- Tornavís punta d'estrella
- Alicates
- Tornavís amb punta intercanviable

2. Desmuntar la tapa de la font

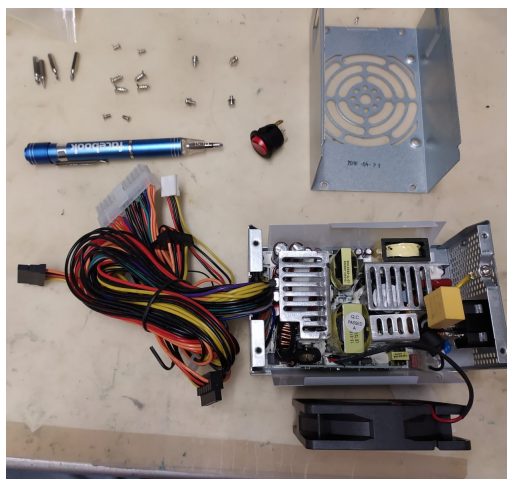


Figura 28: Font sense tapa

3. Tallar cables sobrants

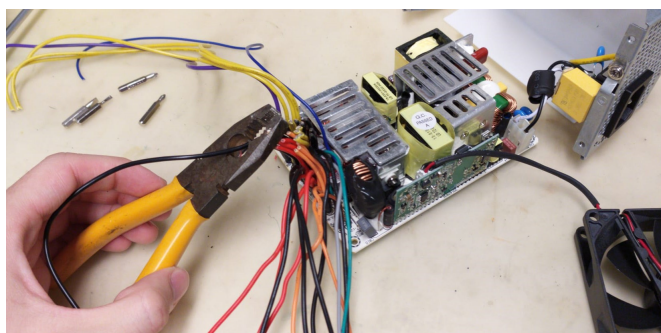


Figura 29: Tallant cables

4. Interruptor amb resistència 100 Ω i LED indicador

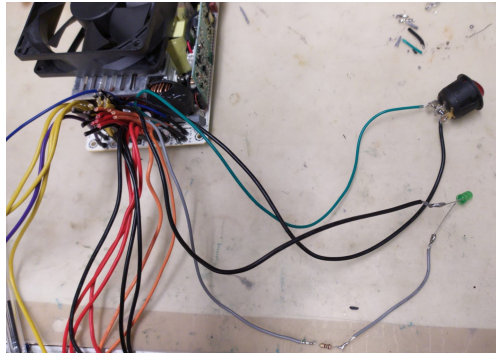


Figura 30: Interruptor, resistència i LED soldats

5. Acoblant regleta pels diferents voltatges necessaris

D'esquerra a dreta tal i com està a la figura 31: un de -12 V, tres de 12 V, tres de 5 V, dos de 3.3 V i tres de 0 V.

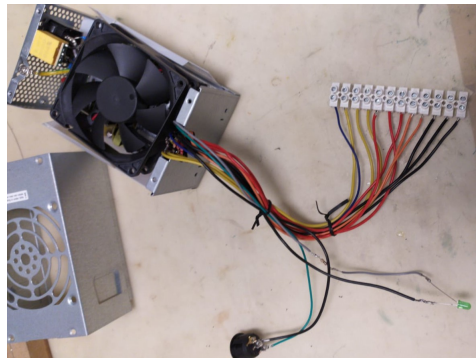
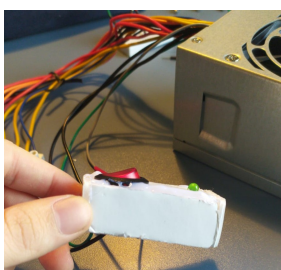
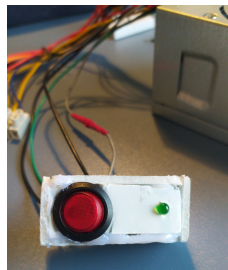


Figura 31: Interruptor, resistència i LED soldats

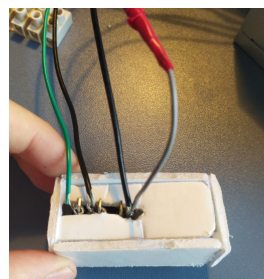
6. Caixetí per l'interruptor amb material reciclat (cartró o cartró ploma"). En el cas del projecte poliestirè expandit de 3 mm entre dues làmines de cartró ("cartró ploma").



(a) Fase 1



(b) Fase 2



(c) Fase 3



(d) Fase 4

Figura 32: Fases de construcció del caixetí, parets enganxades amb pistola termo-segelladora i pintura *Chaos black*

Peces 3D

Per tal de preparar les peces d'impressió 3-D per poder-les muntar s'han llimat, o bé enganxat si es tractaven de dues parts que no es podien imprimir en una sola peça.

8.4 Procés de construcció

1. Primerament s'han preparat les puntes de les potes i per aconseguir una alçada òptima s'ha decidit fer servir una femella com a recurs.

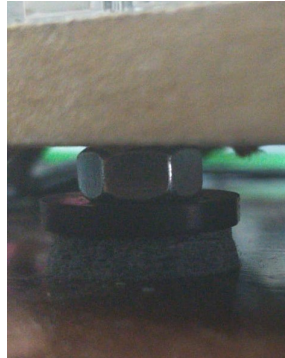
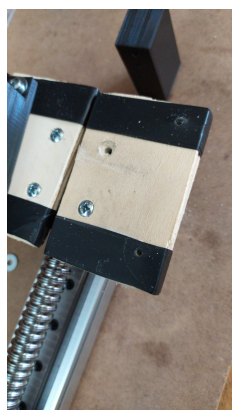


Figura 33: Femella i punta de pota

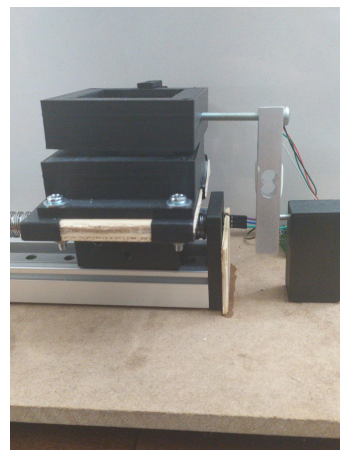
2. S'ha fixat el motor i l'Arduino a la base mitjançant 4 cargol M4 de 16 mm i 3 autoroscant respectivament.
3. S'ha fixat la peça que allotja la cèl·lula de càrrega per la part més propera a la base mitjançant dos cargols.
4. S'ha preparat la Caixa de Casagrande amb les fulloles de fusta fins adquirir l'alçada adequada per tal que la cèl·lula de càrrega quedés a l'alçada correcta. Cal recordar que les fulloles de fusta es substituiran en un futur per una làmina d'alumini.



(a) Fase 0



(b) Fase 1



(c) Fase 2

Figura 34: Fases de l'assemblatge de les fulloles de fusta al motor i la caixa de Casagrande

5. S'ha allotjat el sensor que permetrà reiniciar l'experiment i l'imant s'ha enganxat al motor que serà qui l'activarà.

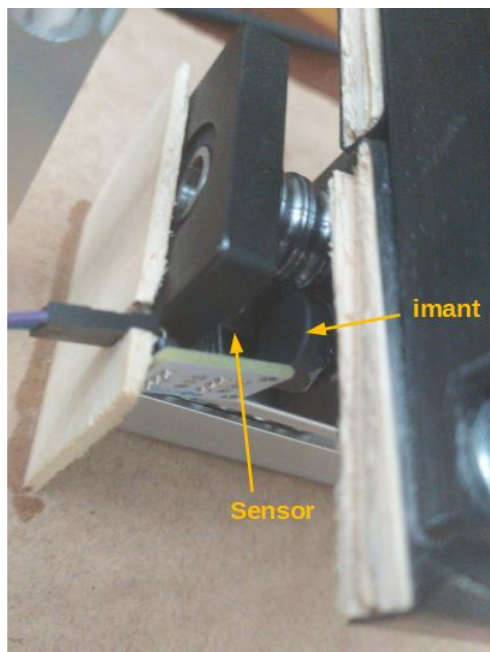


Figura 35: Femella i punta de pota

6. Finalment s'han realitzat totes les connexions entre Arduino, Font, Convertidor i Sensors. Tal com s'exposa a l'esquema de disseny 6.

8.5 Calibratge i posada a punt

El calibratge s'ha analitzat fent un assaig en buit (és a dir sense mostra). Provant el prototip, sense encendre el motor, només per calibrar els sensors.

Per la cèl·lula de càrrega s'ha tarat i desenvolupat una adaptació d'un projecte [5] en el que es trobava el valor de calibratge que calia restar per tal d'obtenir els kg desitjats.

S'han obtingut les gràfiques 21 i 22 on s'hi pot apreciar una certa desviació:

- Força Horitzontal amb desviació estàndard de 0.04 N, que significarà un error estàndard del 4% a les mesures. Desenvolupant un error absolut de 0.04 en alguns casos. Això pot ser degut al soroll que generen altres components o a les soldadures imperfectes.

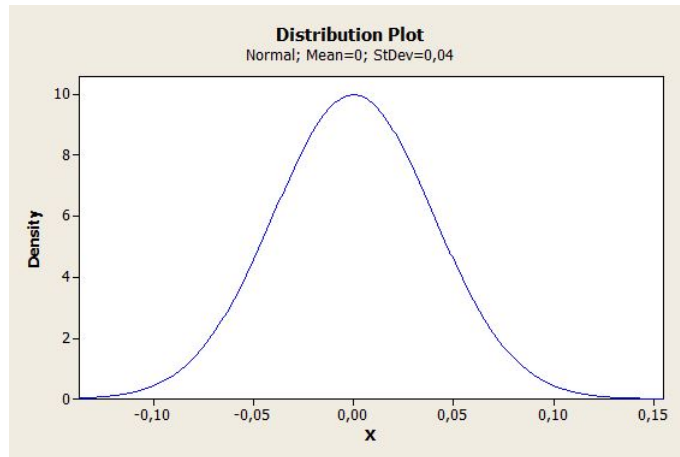


Figura 36: Distribució normal de les dades de la cèl·lula de càrrega en buit

- Desplaçament vertical amb desviació estàndard de 0.0107 mm oscil·lant al voltant de 1.4613 mm. Que representarà un error estàndard del 1% de les mesures i un error relatiu del 0.7%.

8.6 Funcionament del Prototip

Després de realitzar diverses proves i gràcies al *software* desenvolupat, el prototip funciona correctament. Els sensors es troben allotjats en posicions òptimes i reporten les dades de manera correcta.

Tot i que la part del motor s'ha programat com si funcionés, a la realitat això no és possible de manera òptima ja que els *drivers* L298N no proporcionen les condicions favorables i generen masses vibracions. Tot i això el funcionament del sensor que marca que l'experiment s'ha reiniciat correctament si que funciona amb normalitat.

9 Pressupost

El pressupost (taula 3) està format per diferents costos relatius a personal, material, llicències o cost energètic. Dins de cada apartat s'hi especifiquen o bé les unitats o bé les hores, en funció de si es tracta de material o de personal.

PRESSUPOST DEL PROJECTE								
COST MATERIAL								
	Component	model/característica o referència	unitats	preu/unitat	total (€)	prototip	unitats per prototip	Reciclat
1	Font d'alimentació	Seasonic SSP-300TGS Active PFC-300W	3	42.53	127.59	X	1	
2	Cable d'alimentació	Baohning Gtsa-3 N14586	3	1.71	5.13	X	1	
3	Interruptors	250Vac	8	0.07	0.56	X	1	
4	Caixa	1.5Ux178Dx305W	4	15.49	61.69			
5	Cable RS	RS-232 M-M estàndar 25 vias, 2m	3	1.87	5.61			
6	Arduino Mega	Arduino Mega 2560	3	41.8	125.4	X	1	
7	cable impresora	USB A to B	2	2.36	4.72	X	1	
8	Driver	OC06	4	37.9	151.6			
9	Driver	L298N dual H bridge	5	3.198	15.99	X		
10	Driver	HY-DIV268N	1	23.75	23.75	X	1	
11	LED	Diode verd	2	0.5	1	X	2	
12	Resistència	1kOhm	1	0.2	0.2		1	
13	Potenciòmetre	lliscant 10 kOhm <i>pm</i> 20%, 0,1W, Serie PTA 1 20mm	10	1.07	10.7			
14	Sensor Reflector sharp	GP2Y0A51SK0F	8	6.8	54.4			
15	Base múltiple femella	Winslow 2.54 mm 20 pins 1 fila	20	0.508	10.16	X	1	
16	Relotge DS3231	FeatherWing Precision Clock (RTC) Board	3	12.46	37.38			
17	Sensor efecte Hall	49E	2	0.25	0.5	X	1	
18	Motor pas a pas amb rosca	Nema 23 amb 2.8A 24V	3	34.99	139.96	X	1	
19	cables arduino	mascle-mascle /mascle-femella	40	0.04475	1.79	X	20	
20	Cèl·lula de càrrega + mòdul	20kg i mòdul HX711	2	11.99	23.98	X	1	
21	Sensor efecte hall amb mòdul	VMA313	2	2.495	4.99	X	1	
22	Convertidor	COCAR/EKYLIN T122405 120W 12DC-24DC 5A	1	15.99	15.99	X	1	
23	Casquet per cables RS	M16 607897	10	0.16	1.6			
24	cargols, volandera i femella	20 mm cap d'estrella, rosca M4	4	0.6	2.4	X	4	
25	cargols de rosca M4	16 mm cap d'estrella, rosca M4	4	0.2	0.8	X	4	
26	potes	potes de taula o cadira	8	0.15	1.2	X	8	
27	cargol de rosca M5	40 mm cap d'estrella	1	0.2	0.2	X	1	
28	imans cúbics (8x8x8 mm)	2.5 kg neodimi tipus N33	20	0.5475	10.95	X	20	
29	femelles	per cargols M4	4	0.4875	1.95	X	4	
30	placa de poliestirè expandit	100 x 100 mm	1	0	0	X	1	Si
31	cargols autoroscants	5 mm cap d'estrella	8	0	0	X	8	Si
32	base de fusta	lleixa de 250 x 600 x 10 mm	1	0	0	X	1	Si
33	fulloles de fusta	caixa d'ampolles de vi 30 x 15 x 3.5 mm	4	0	0	X	4	Si
34	peces 3D	PETG a densitats 25% i 40%	8	7.5625	60.5	X	8	
COST PERSONAL								
	Titulació / categoria	Tasca/projecte	hores	preu/hora	total (€)			
1	Enginyer Tècnic (<2 anys d'experiència)	I+D	400	17.5	7000			
COST ENERGÈTIC								
	Tipus d'energia amb mercat regulat	franja	hores	preu/kWh	total (€)			
1	Elèctrica (Tarifa general) 2A	diurna (mitjana)	250	0.092	23			
2	Elèctrica (Tarifa general) 2A	nocturna (mitjana)	100	0.045	4.5			
COST DE LICÈNCIES								
	Tipus de programa	nom	preu llicència anual		total (€)			
1	Editor de text	LaTeX	0		0			
2	Disseny 3D	Solidworks - llicència d'estudiant	0		0			
3	Editor d'esquemes i diagrames	Diagrams.net	0		0			
COST TOTAL DEL PROJECTE					7933.95 €			
COST TOTAL DEL PROTOTIP (només a nivell material)					314.75 €			

Taula 3: Pressupost General

10 Impacte ambiental i social

L'objectiu del següent apartat és estudiar quin serà l'impacte que en la fase de realització del projecte i la posterior fase de funcionament d'aquest provocarà sobre l'entorn. Sovint es relaciona aquest impacte només amb el medi ambient però l'entorn també pot incloure l'impacte sobre les persones, les alternatives aportades a la societat... Com s'ha comentat en la introducció 2.1 del projecte l'objectiu transversal que es volia aconseguir era un model basat en el codi obert, és a dir, un model transparent, lliure i flexible. Analitzant com això pot suposar un impacte sobre l'entorn se'n poden treure diverses valoracions.

Primer de tot, el fet d'haver creat un model amb codi obert suposa que en qualsevol moment es poden fer modificacions en qualsevol de les parts i, per tant, millores. Veient la naturalesa del projecte això és un factor molt important ja que els futurs usuaris, o el Laboratori de Mecànica de Sòls, podran adaptar el projecte a futures pràctiques, experiments o projectes de qualsevol altra índole.

També cal destacar que el fet de tenir accés a tots els plànols i codi permet replicar el projecte no només als membres del Departament de d'Enginyeria Civil i Ambiental (DECA) sinó a qualsevol altra persona interessada en mecànica del sòls.

Finalment, el tret més important d'haver fet un model basat en el codi obert és la creació de coneixement gratuït i fàcilment accessible. Tot i l'evidència de que aquest és un projecte que resol una problemàtica molt concreta, les diverses parts d'aquest poden ser fàcilment extrapolables per a multituds de projectes diferents, creant d'aquesta manera, un granet de sorra a una base de coneixement col·lectiva de lliure accés. Per tant, s'aconseguirà apropar la tecnologia a les persones.

Tot i això, l'impacte que es crea sobre el medi ambient no es pot menystenir i és important analitzar-ho per tal de ser coneixedors de què suposa la nostra acció i quines opcions o alternatives existeixen per mitigar-lo. En la realització d'aquest projecte i en la fase de funcionament es poden identificar dues accions diferenciades en què hi ha una afectació directa sobre el medi ambient: el consum d'energia en el disseny, la fabricació i el posterior ús.

En la fase de disseny hi ha hagut un consum d'energia en forma d'electricitat a causa de les hores invertides en l'ús de l'ordinador. Qualsevol consum d'energia provoca emissions de CO₂ al medi ambient i per fer el càlcul d'aquestes s'hi ha d'aplicar un factor d'emissió de CO₂ al subministrament elèctric. Aquest factor, també anomenat mix elèctric, és de 181 g CO₂/kWh.[31] Aquestes emissions queden reflectides a la següent taula:

kW ordinador	Hores	kWh	Emissions kg CO ₂ /kWh	Emissió CO ₂
0.22	350	77	0.181	13.94

Taula 4: Emissions durant el disseny

Altrament, en la fase de fabricació hi ha diversos impactes sobre el medi ambient. El primer impacte a considerar, i potser el més important, és el que provoca el consum de material electrònic. Els dos grans problemes que l'ús de material electrònic provoca és la dificultat de fer una traçabilitat en el seu procés d'obtenció i en la mala praxis que se'n fa a l'hora de reciclar-lo.[32]

Pel que fa a l'obtenció de les matèries primes és sabut que en molts casos l'extracció d'aquestes es fa en condicions que no respecten els drets humans. Per exemple, l'extracció del coltan, que se centra en un 80% a la República Democràtica del Congo, està controlada per diversos grups armats i es calcula que l'extracció d'un quilogram de coltan costa la vida de dues persones. [33]

Un altre gran problema que presenten els equips electrònics és el reciclatge. Gran part de les deixalles acaben a països com Ghana i Xina on hi ha abocadors de grans dimensions. Aquests abocadors hi treballen una gran quantitat de gent amb molt males condicions laborals i de salut. És per això que en aquest projecte s'ha reciclat tota la deixalla electrònica en punts verds per evitar en la mesura del possible que aquestes pràctiques s'acabin produint. [34]

11 Conclusions

Es considera que s'ha complert el principal objectiu de realitzar un equip de laboratori amb codi obert. S'ha intentat descriure molt els procediments de construcció i programació per tal de que sigui fàcilment replicable i s'ha basat amb plataformes de coneixement compartit com *github*³.

Ha sigut una tasca difícil degut al factor multidisciplinari del projecte. Tot i així s'ha gaudit de l'experiència de treballar i estudiar diversos camps que han sigut claus també durant els estudis del Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials. De vegades, però, ha resultat complex marcar la frontera de la curiositat per intentar implementar millores en el disseny i això ha fet perdre temps.

Si bé és clar que no s'ha pogut complir amb tots els objectius, ja que no s'ha pogut provar el motor, sí que s'ha complert la majoria dels mateixos i la tasca queda molt ben enfocada de cares a l'evolució del projecte dins del departament de DECA.

El pressupost deixa molt clar el cost material del projecte que un cop ja s'ha dissenyat resultarà un cost aproximat (més el cost de construcció) baix. Podria arribar a costar uns 400 euros enfront els 40.000 que costa la màquina d'assaig de tall directe professional amb precisió de nanòmetres.

Es creu que la velocitat escollida és correcta (ja que està dins el rang de treball d'una màquina professional) però podria ser més baixa per tal d'ajustar-se més ja que queda gaire al límit. El límit superior d'una màquina professional són 0.163 mm/s i la velocitat escollida per l'experiment és de 0.134 mm/s. Potser podria reduir-se unes 10 vegades.

La peça caixa base s'hauria d'haver imprès amb més densitat. Tal com s'ha explicat a l'apartat 6.1.2 la base de la caixa de Casagrande suporta un moment extern que també pot afectar a la normal disposició de l'experiment. Aquest moment farà que la mostra no rebi un esforç tallant perfecte ja que les distàncies entre les forces proporcionaran una variació.

La situació de la pandèmia global per la qual hem passat els últims mesos han augmentat la dificultat del treball. Tant a nivell personal i de motivació com material o d'accés a les eines. A nivell personal he hagut de canviar de domicili i cuidar de la família durant dos mesos en els que el projecte es va veure afectat. El suport que s'ha rebut per part del laboratori de Geotècnica i dels diferents professors ha estat diferent al que s'hagués pogut rebre anant cada setmana al laboratori i comentant els progressos o els errors.

³Plataforma de coneixement compartit tant de codi com de projectes <https://github.blog/>

12 Propostes de Millora

12.1 Nivell electrònic

Després de diverses proves amb els *Drivers* OC06 i L298N s'ha pogut verificar que es necessita un *Driver* més potent. Mitjançant el *Driver* L298N es podia fer arrancar el motor però a 12 V, no a 24 V com indica la fitxa tècnica que és on es situa el funcionament òptim. És per això que la implementació d'un *Driver* òptim queda pendent. Es podria fer el canvi de *Driver* a un industrial per tal de suportar més amperatge. Tal com diu a la fitxa tècnica [35] el seu corrent d'excitació màxima són 5 A i per tant podria funcionar amb el convertidor de DC-DC de 12 V a 24 V.

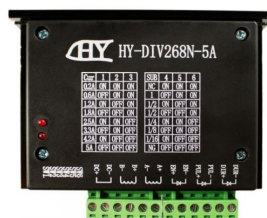


Figura 37: *Driver* industrial [10]

Aprofundir en el coneixement del mòdul HX711 per tal de reduir la desviació de les dades de força estudiant la llibreria HX711 de manera profunda [36].

Col·locar tots els cables de manera que no hi hagi interferències ni generin cap efecte sobre el sorolls de les senyals. Potser generar un circuit imprès que contingui els mòduls dels sensors i els LED's d'encesa i de parada del motor.

12.2 Nivell mecànic

La proposta de millora a nivell mecànic passa per repensar la col·locació de les peses d'una manera que encaixin més i potser podrien reposar sobre una superfície més extensa. Per tal de millorar l'estabilitat.

Imprimir les peces amb més precisió i aconseguir els 50 mm exactes de la norma UNE 103401 per caixes de Casagrande.

Aprofundir en l'anàlisi del sistema mecànic. Estudiar la part dinàmica i de les tensions màximes que afecten les peces que conformen la caixa. I realitzar l'anàlisi d'elements finits.

12.3 Nivell informàtic

El programa encara no es considera compacte, tot i que és funcional. El fet de recol·locar el motor de manera manual és una tasca que pot resultar feixuga per la usuària. Per tant, en un futur s'hauria d'automatitzar la parada i el reiniciar de la màquina.

Es podrien explotar més els objectes tipus classe i potser fer una classe que acumulés totes les funcions relatives a les comunicacions.

També s'hauria d'implementar totalment la versió en anglès.

Agraïments

Primer de tot voldria agrair a la meva tutora, la Cristina, tot el suport i empenta que m'ha proporcionat durant la realització del projecte. També al departament de DECA secció d'enginyeria del terreny de l'Escola de Camins per la oportunitat de col·laboració.

En segon lloc m'agradaria donar les gràcies a la meva família, tant el meu pare i la meva mare com la meva germana, yaya, tia-àvia, tiets, tiets valencians, cosins i cosines, per tot l'escalf i ànim tant durant el projecte com durant els últims 6 anys. Incondicionals i incansables sempre han estat allà encara que no entenien les problemàtiques o la dificultat en alguns moments si que veien la meva desesperació i mantenien la meva il·lusió per continuar estudiant i així com esperança de que tot sortiria bé.

En tercer lloc voldria agrair també a totes les persones properes, amics, amigues i companys que durant aquesta etapa han bolcat el seu amor i motivació en mi per ajudar-me.

Bibliografia

- [1] M. Cano, "Mecànica del Sòl i Mecànica de les Roques," 2016. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/53906>
- [2] A. Ledesma, P. C. Prat, A. Lloret, R. Chacón, and M. Sondon, "Laboratory experiments in Soil Mechanics by means of digital twins and low-cost equipment," no. June, pp. 1–9, 2020.
- [3] "Seasonic SSP-300TGS Bulk 300W TFX | Stort udvalg, afhentning eller hurtig levering | Århus PC-Lager ApS." [Online]. Available: <https://pc-lager.dk/en/p/seasonic-ssp-300tgs-bulk-300w-tfx-989817871>
- [4] "Arduino Mega 2560 Rev3 | Arduino Official Store." [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>
- [5] "Amplificador HX711 con Arduino para crear una báscula digital." [Online]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/hx711-arduino-bascula-digital/>
- [6] "Fitxa tècnica motor pas a pas inclosa a l'annex."
- [7] "100mm Length Travel Linear Stage Actuator with Square Linear Rails + CBX1605 Ball Screw 1605 Ballscrew Motorized XY XYZ Linear Stage Table with NEMA23 Stepper Motor for DIY CNC Router Milling Machine: Amazon.com: Industrial Scientific." [Online]. Available: https://www.amazon.com/Actuator-CBX1605-Ballscrew-Motorized-Stepper/dp/B077PQYXWM/ref=pd_day0_328_7?encoding=UTF8&pd_rd_i=B077PQYXWM&pd_rd_r=73bcf662-626d-4f9b-b553-8d778795756f&pd_rd_w=cKKQp&pd_rd_wg=LdJqu&pf_rd_p=92ee6eda-fccf-47b6-ba0e-46d82b2113f3&pf_rd_r=W5HNDAFKZRHWBKG92Q1&psc=1&refRID=W5HNDAFKZRHWBKG92Q1
- [8] "L298 Módulo Puente H -El Más Usado- | PatagoniaTec." [Online]. Available: <https://saber.patagoniatec.com/2014/07/puente-h-l298-modulo/>
- [9] "Motor Sizing Calculations." [Online]. Available: <https://www.orientalmotor.com/technology/motor-sizing-calculations.html>
- [10] "Driver HY-DIV268N de 5A para Motor Paso a Paso PaP." [Online]. Available: https://electropro.pe/index.php?route=product/product&product_id=540
- [11] "Technical Program - GEE2020." [Online]. Available: <https://www.erasmus.gr/microsites/1168/technical-program>
- [12] M. À. Essomba i Gelabert, "Codi Obert," p. 219, 2008. [Online]. Available: https://ca.wikipedia.org/wiki/Codi_obert
- [13] "Yours for the making - Instructables." [Online]. Available: <https://www.instructables.com/>
- [14] A. E. de Normalización y Certificación. UNE 103401, "Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo." 1998. 33p.

- [15] P. Catalan, "Diagrama de fases i paràmetres del sòl Paràmetres d' identificació del sòl," Apunts de l'assignatura de mecànica dels Sòls, 2020.
- [16] E. Lupon, "T4 - Introducció als dispositius electrònics i a l'anàlisi dels circuits electrònics," pp. 1–22, Apunts de l'assignatura d'Electrònica (ETSEIB), 2019.
- [17] O. Paris, M. Rodriguez, and J. Altimira, "INTRODUCCIÓ als sistemes INDUSTRIALITZATS," pp. 1–23, Apunts de l'assignatura d'Electrònica (ETSEIB), 2019.
- [18] V. Sfx, "SWITCH MODE POWER SUPPLY SSP-300TGS ACTIVE PFC FEATURES : ELECTRICAL SPECIFICATIONS :," *Web*, p. 300, 2020.
- [19] "Arduino Project Hub." [Online]. Available: <https://create.arduino.cc/projecthub>
- [20] "What is Arduino? - Definition from Techopedia." [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/definition/27874/arduino>
- [21] C. R. I. Clayton, "The Use of Hall Effect Semiconductors in," pp. 69–76, 2011.
- [22] U. Manual, "Arduino ® compatible hall (holzer) magnetic switch module (2 pcs) user manual," pp. 2–5, 2017. [Online]. Available: https://www.velleman.eu/downloads/29/vma313_a4v01.pdf
- [23] Wikipedia, "Galga extensiométrica — wikipedia, la enciclopedia libre," 2020, [Internet; descargado 11-abril-2020]. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Galga_extensiom%C3%A9trica&oldid=124507141
- [24] ElectroFun, "Data Sheet - HX-711," *Web*, vol. 9530, no. 592, p. 1, 2017. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [25] S. Galceran, "Màquines Elèctriques - Introducció (ETSEIB)," pp. 1–9, 2019.
- [26] S. Sainz, L i Galceran, "Conversió Elèctromecànica electromecànica," pp. 1–8, 2013.
- [27] L. Sainz Sapera, "Màquines Elèctriques - Màquina síncrona (ETSEIB)," 2015.
- [28] G. Liptak Bela, "Instrument Engineers' Handbook, Volume Two: Process Control and Optimization - Google Books." [Online]. Available: https://books.google.co.uk/books?id=TxKynbyaIAMC&dq=Instrument+Engineers%27+Handbook&pg=PP1&ots=jvrdPR7wxJ&sig=1hOUpQQDQH_8drYjW1yPVocJSYI&hl=en&sa=X&oi=book_result&ct=result#v=onepage&q=InstrumentEngineers'Handbook&f=false
- [29] R. Lamaison, "INTRODUCCIÓ ALS SISTEMES D' ELECTRÒNICA DE POTÈNCIA," Apunts de l'assignatura d'Electrònica (ETSEIB), 2020.
- [30] "Impressores 3D online | MakerShopBcn." [Online]. Available: <https://makershopbcn.com/ca>
- [31] "Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADE-RO (GEI)," Tech. Rep.

- [32] A. O. Leung, W. J. Luksemburg, A. S. Wong, and M. H. Wong, "Spatial distribution of poly-brominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at Guiyu, an electronic waste recycling site in southeast China," *Environmental Science and Technology*, vol. 41, no. 8, pp. 2730–2737, apr 2007.
- [33] "Coltán, la maldición del Congo." [Online]. Available: <https://www.elindependiente.com/futuro/2018/02/04/coltan-congo-antonio-pampliega/>
- [34] "Agbogloboshie, el basurero electrónico presente en Ghana - Reporteros." [Online]. Available: <https://www.france24.com/es/20190623-reporteros-ghana-agbogloboshie-contaminacion-electronica>
- [35] Electropro, "Hy-Div268N-5a," vol. 51, no. 073, pp. 8–10.
- [36] "HX711/HX711.h at master · bogde/HX711 · GitHub." [Online]. Available: <https://github.com/bogde/HX711/blob/master/src/HX711.h>